STRUCTURAL ANALYSIS OF MOLTEN STEEL LADLES OF TAMSA

G. Sánchez Sarmiento [1,2]
J.L. Otegui [3]
A. Cisilino [3]
M.J. Mizdrahi [1]
M. Pizzi [1]
R. Espinosa [4]
R. Díaz [4]
L. Ferro [4]

ABSTRACT

The design and the finite element analysis of two different alternatives for the increment of capacity of molten steel ladles of TAMSA, México, are described in this paper. Initially these ladles was designed for hosting 170 tons of liquid steel. With the present study we get an increment of the ladles height in 200 mm, which corresponds to an increment of the theoretical capacity in 10 to 11 tons, carrying it to a value of 163 tons.

Two alternative ways has been study for this capacity increment: a) mantaining the conicity of the shell in the zone of the extension; and b) the shell extension with cilindrical geometry.

The design has been verified by means of the application of Standard AISE N° 9, and also by finite element analysis for the original geometry as well as both alternatives proposed, using the system ABAQUS/Standard. The three finite element models have been developed by means of ABAQUS/CAE, the Pre- and Post-processor of ABAQUS.

The heat transfer models for calculating the thermal loads over the structure has been adjusted by thermographies performed in plant, obtaining good agreements between the models and the measurements.

By the application of the Standard AISE N° 9 as well as the finite element analysis, one can conclude that both geometric aternatives are adequate under a structural point of view.

A detailed description of the results of strain and stresses at the complete ladle shell are presented in the report of ref. 1. They can be used for later analysis for the evaluation of new distributions of refractories, and for modifications of the mechanical design of some structural details. The results give basic indications about the most important aspects that must be taken into account for these modifications. A brief review of the results are presented in this paper.

1) KB Engineering SRL. Florida 274, Of. 35. (1005) Buenos Aires.Argentina. sanchezsarmiento@arnet.com.ar.
2) Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Av. P. Colón 850, Buenos Aires, Argentina.
3) INTEMA, Universidad Nacional de Mar del Plata. Av. J.B. Justo 4300. Mar del Plata, Argentina.
4) TAMSA – Tenaris Group, Km. 433.7 Carr. México – Veracruz, México.

EXTENSION DE VIDA RESIDUAL DE CUCHARAS DE COLADA DE ACERO

G. Sánchez Sarmiento [1,2]
J.L. Otegui [3]
A. Cisilino [3]
M.J. Mizdrahi [1]
M. Pizzi [1]
R. Espinosa [4]
R. Díaz [4]
L. Ferro [4]

1. INTRODUCCIÓN

Se describe en este trabajo el diseño de dos alternativas diferentes para el aumento de la capacidad de las cucharas de acería de TAMSA, México, y un análisis estructural por elementos finitos de las cucharas tanto en su conformación actual como así también con ambas alternativas, con la finalidad de verificar que tales diseños cumplan con las normas de cálculo.

Inicialmente las cucharas de acería de TAMSA estaban diseñadas para alojar 170 Tm de acero líquido. Con el presente estudio se ha conseguido incrementar la altura de dichas cucharas en 200 mm, lo que se refleja en un incremento de la capacidad teórica en 10 a 11 Tm, llevando la misma a un valor de 163 Tm.

El incremento de capacidad propuesto ha consistido en aumentar la altura de la cuchara en su parte superior, según dos alternativas diferentes:

1) Con la extensión manteniendo la conicidad de la carcaza.
2) Con una geometría cilíndrica de la extensión de la carcaza.

El diseño ha sido verificado mediante la aplicación de la Norma AISE N° 9 y sendos análisis estructurales mediante elementos finitos tanto de la geometría original como de ambas alternativas propuestas, empleando el Sistema ABAQUS/Standard, Versión 6.3 [1], con el que se calcularon los estados de tensiones en la carcaza de las cucharlas ante tres estados básicos de carga. Los tres modelos de cuchara han sido desarrollados con ABAQUS/CAE, el Módulo Preprocesador de ABAQUS [2].

Los modelos de transferencia de calor para calcular las cargas térmicas sobre la estructura, empleando el mismo Sistema ABAQUS/Standard, han sido ajustados con termografías realizadas en planta, obteniéndose acuerdos muy satisfactorios entre el modelo y tales mediciones, lo que garantiza la correcta aplicación de dichas cargas.

Tanto de la aplicación de la Norma AISE N° 9 como de los resultados del análisis estructural por elementos finitos, surge que ambas alternativas son factibles bajo el punto de vista estructural.

Se presenta en el Informe de Ref. 3 una pormenorizada descripción de resultados de tensiones y de deformaciones en toda la carcaza, que pueden emplearse en posteriores análisis para la evaluación de nuevas configuraciones de refractarios, y de modificaciones del diseño mecánico de algunos detalles estructurales. Los resultados dan indicaciones básicas sobre las cuestiones más importantes que deben tenerse en cuenta para tales modificaciones. En este trabajo se hace una somera revisión de los resultados más importantes descriptos en ref. 3.

2. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS DESARROLLADOS.

Una vista completa del modelo desarrollado para la geometría original de la cuchara, se observa en la figura 1, y en la figura 2 su discretización en elementos finitos sólidos tridimensionales y de tipo cáscara. Detalles de las dos alternativas de diseño para la parte superior de la carcaza se aprecian en las figuras 3 y 4.

---

5) KB Engineering SRL. Florida 274, Of. 35. (1005) Buenos Aires.Argentina. sanchezsarmiento@arnet.com.ar.
6) Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Av. P. Colón 850, Buenos Aires, Argentina.
7) INTEMA, Universidad Nacional de Mar del Plata. Av. J.B. Justo 4300. Mar del Plata, Argentina.
8) TAMSA – Tenaris Group, Km. 433.7 Carr. México – Veracruz, México.

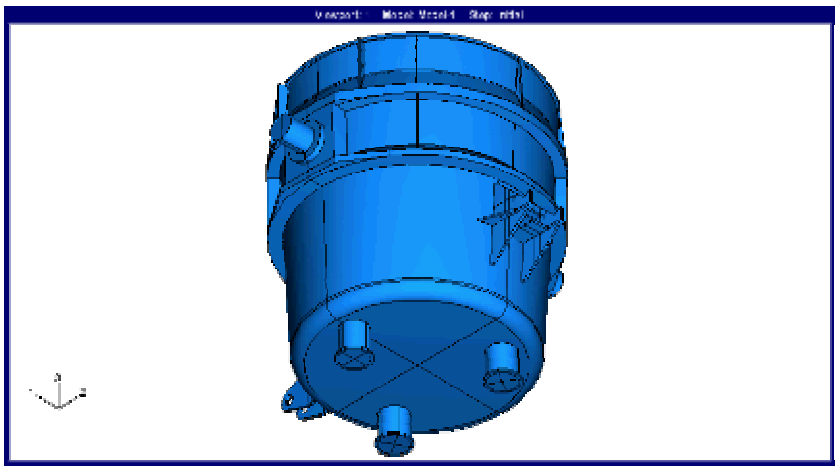

Figura 1. Modelo geométrico desarrollado para el diseño original de las cucharas.
Figure 1. *Geometric model developed for the original design of the ladles.*

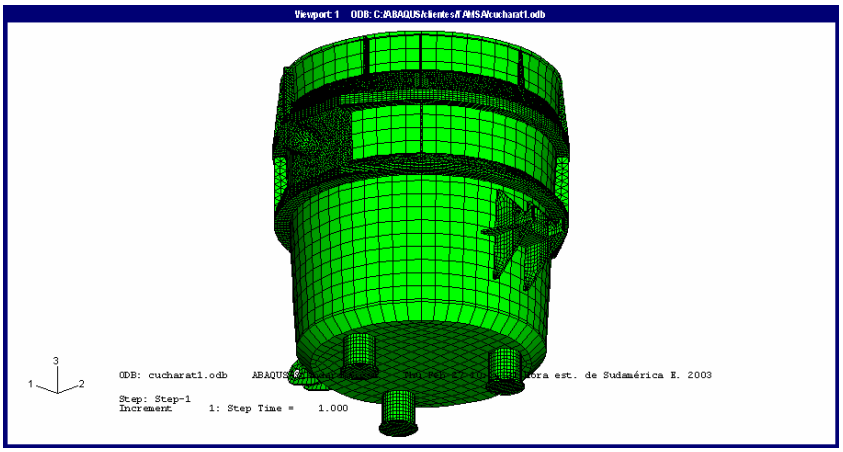

Figura 2. Discretización en elementos finitos.
Figure 2. *Finite element mesh.*

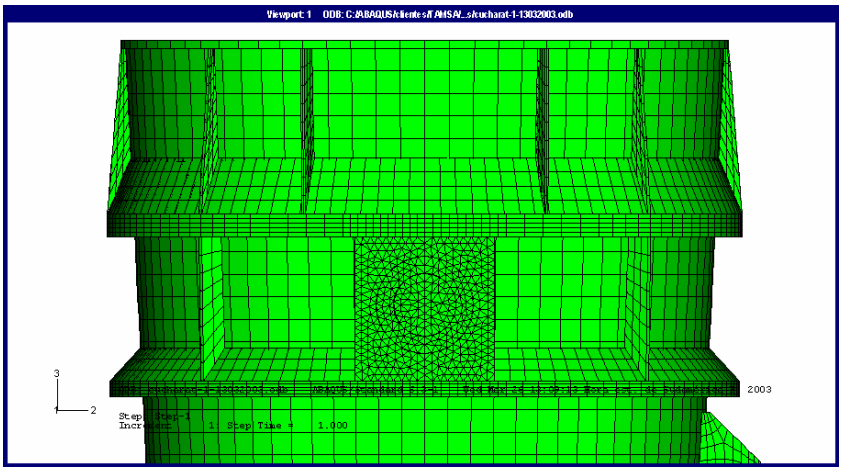

Figura 3. Detalle superior para la alternativa 1 de modificación geométrica.
Figure 3. *Detail of the upper zone for the alternative 1 of geometric modification.*

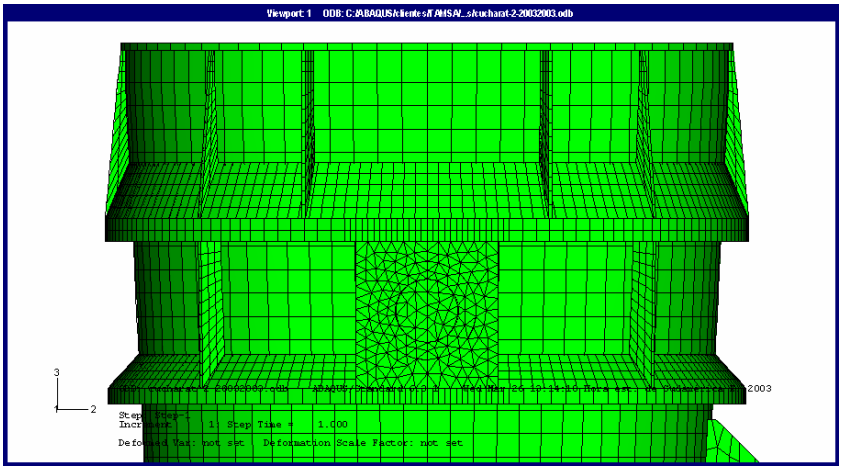

Figura 4. Detalle superior para la alternativa 2 de modificación geométrica.
Figure 4. *Detail of the upper zone for the alternative 2 of geometric modification*

3. ETAPAS DE LAS CUCHARAS EN SERVICIO.

El análisis estructural de las cucharas debe contemplar todas las cargas mecánicas y térmicas que soportan las mismas en sus condiciones más desfavorables. A tal efecto debe tenerse en cuenta todas las solicitaciones durante su ciclo de servicio, el cual está constituído por las siguientes cinco etapas sucesivas:

1. Etapa de precalentamiento (o de secado).

Para el secado de la cuchara se presentan tres opciones a considerar:

a) La cuchara es completamente nueva incluyendo la seguridad (figura 5);
b) La cuchara tiene completo el revestimiento de trabajo (figura 6);
c) La cuchara ha sido reparada parcialmente (normalmente cambio de línea de escoria, además de blocks porta-tapón y porta-búza), ver figura 6.

En cualquiera de las tres situaciones, la cuchara interrumpe su secado en el quemador vertical y se pasa al precalentador horizontal donde termina su ciclo de secado mientras se acondiciona para la operación, lo cual incluye instalación de los tapones porosos, la válvula Flo-Con, boquillas y placas de vaciado, etc.

2. Etapa de llenado ("tapping")

De la etapa de secado se pasa a la adición de arena de taponamiento y posteriormente a un quemador vertical donde se espera a que el horno solicite cuchara para vaciar. Cuando esto ocurre pasa al carro de vaciado donde recibe el acero a una temperatura que oscila entre 1600 y 1620°C.

3. Etapa de transporte

La cuchara pasa al LF en donde del proceso depende de si va a ir al VD o no. Cuando la cuchara no va a VD el proceso toma 30 minutos como mínimo y luego 10 min de flotación, saliendo posteriormente a una temperatura de 1570-1590^{o}C. En el caso de ir al VD el proceso toma 30 minutos como mínimo en LF y 50 min más en el VD, saliendo del LF al VD a una temperatura entre 1610 ^{o}C y 1650 ^{o}C dependiendo del grado de acero y de la temperatura del equipo VD.

4. Etapa de vaciado

Sin importar su procedencia (LF o VD) las coladas deben llegar a una temperatura entre 1560 ^{o}C y 1590 ^{o}C dependiendo del grado del acero a elaborar.

La temperatura de colado en la MCC varía dependiendo del grado y tipo de acero, y puede tomar un valor desde 1500 hasta 1570 ^{o}C. Los tiempos de colado son en promedio de 77 min para el calibre 215, 73 min para el calibre 270, 71 min para el calibre 310, y de 68 min para los calibres 330 y 370. Durante la etapa de colado y durante los traslados de una estación a otra, la cuchara se encuentra con tapa.

5. Etapa de enfriamiento

Al terminar de colar la cuchara es destapada y se manda a eliminación de los residuos de acero y escoria.

Figura 5. Evolución de la temperatura de la cara caliente de los refractarios de la cuchara

Figura 6. Evolución de la temperatura de la cara caliente de los refractarios de la cuchara durante las opciones b) y c) de secado.

Figure 6. *Temperature evolution of the laddle refractories' hot face during options a) and b) of drying.*

Posteriormente en una mampara, la cuchara pasa a limpieza del orificio de vaciado, revisión y limpieza de

4. ANALISIS ESTRUCTURAL REALIZADO

5.1. Metodología de cálculo.

Siguiendo una metodología desarrollada por los autores junto con la Dra. Analía Gastón, con programas computacionales desarrollados por los mismos [4-16] y con la experiencia de varios análisis similares [17-18], se ha realizado el presente análisis siguiendo las siguientes etapas:

1. Aplicación de la Norma AISE N° 9.
2. Simulación de la transferencia de calor en la carcaza y en los refractarios durante todo el ciclo térmico con el sistema TEMALC.
3. Mediciones de la temperatura en la carcaza y refractarios de la cuchara, mediante termografía o termo-cuplas.
4. Cálculo por elementos finitos de la distribución espacial de la temperatura en toda la carcaza de la cuchara, empleando el Sistema ABAQUS/Standard. Ajuste de coeficientes de transferencia térmica.
5. Estimación de la presión máxima sobre la carcaza ejercida por la dilatación térmica de los refractarios.
6. Eleccion de los casos de cargas mecánicas y térmicas más desfavorables.
7. Análisis por elementos finitos de las deformaciones y tensiones en toda la carcaza para los casos de cargas más desfavorables.

5.2. Aplicación de la Norma AISE N° 9.

En el Informe de ref. 19 se describe la aplicación a las presentes cucharas de la Norma AISE N° 9 ("Specification for Design and Use of Ladles") [20]. Se analizaron tanto el diseño original como las dos alternativas propuestas.

Para la geometría original se determinaron las tensiones admisibles aplicables al diseño, se verificó la localización del eje de los muñones respecto del centro de gravedad de la cuchara y se verificaron detalles constructivos (tratamientos térmicos, materiales, soldaduras, etc.). Finalmente, se verificaron el conjunto placa-pernos de los muñones, espesor de la envolvente y espesor de fondo.

Por su parte, para las dos alternativas de aumento de la altura de la cuchara, realizando el mismo análisis se comprobó que el incremento de altura tiene los siguientes efectos sobre la integridad de la cuchara:

a) Induce un incremento del espesor del fondo y de los refuerzos, sin embargo el espesor actual es mayor que el espesor así incrementado.

b) Cambia el centro de gravedad de la cuchara en una magnitud menor a la desviación admisible.

Por consiguiente, para la Norma AISE N° 9 son verificadas las dos alternativas de modificación de estas cucharas.

5.3. Simulación de la transferencia de calor en todo el ciclo térmico con el sistema TEMALC.

El Modelo Computacional **TEMALC** (**TEM**peratura del **A**cero **L**íquido en **C**ucharas) ha sido desarrollado oportunamente para SIDERAR S.A.I.C. por **SOFT-ING Consultores**, con la colaboración del **Instituto Argentino de Siderurgia** (IAS). TEMALC tiene por objeto la determinación de la distribución espacial y temporal de la temperatura en una cuchara para colada de acero, en forma acoplada con la evolución de la temperatura del metal líquido, ante las sucesivas operaciones que se realizan en una planta de acería [8].

Para la simulación del colado, inicialmente el programa calcula la variación de la temperatura en el chorro de acero líquido resolviendo por un esquema de Runge-Kutta una ecuación diferencial ordinaria de primer orden. El campo no estacionario de temperatura de la cuchara es resuelto a través de una formulación en elementos finitos bidimensionales axisimétricos, y un esquema de diferencias finitas tipo Crank-Nicolson para la variable temporal. La red de elementos finitos se genera automáticamente en el programa en base a los parámetros geométricos de la

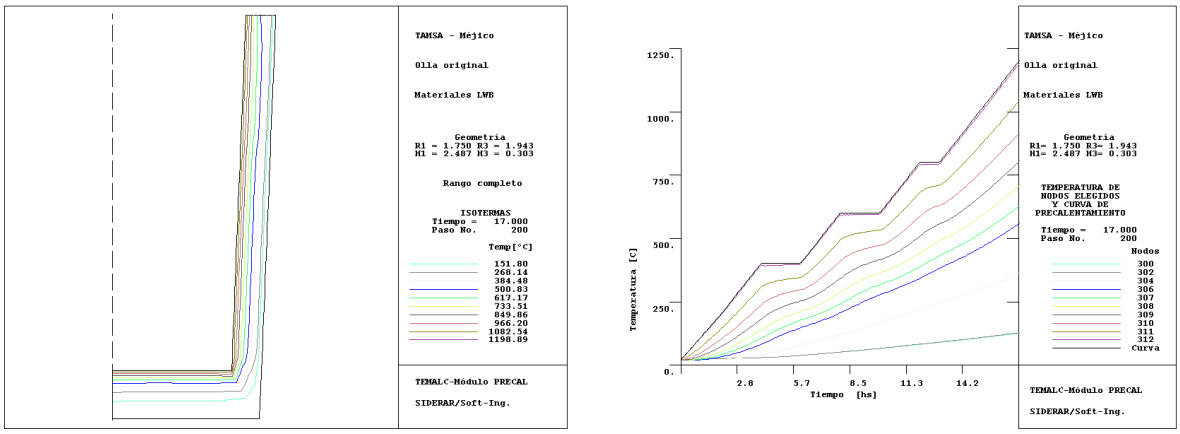

Figura 8. Resultados obtenidos con el Programa TEMALC durante el proceso de precalentamiento para la opción a): Izquierda: Distribución de isotermas a las 17.00 hs de iniciado el precalentamiento. Derecha: Evolución de la temperatura en varios puntos a través del espesor.

Figure 8. *Results obtained by the Program TEMALC during the preheating process for option a). Left: Distribution of isoterms up to 17.00 hs of begining the preheating. Right: Temperature evolution at several points along the thickness.*

cuchara. En el interior de la cuchara, por encima del nivel de acero líquido se considera intercambio de calor por radiación en forma acoplada con la conducción en la cuchara. Se simula un nivel de acero líquido que ocupa un espacio variable dentro de la cuchara, definido por la variación temporal del nivel del mismo por encima del fondo de aquella. De esta manera se simulan indistintamente las sucesivas operaciones realizadas con la cuchara, como

casos particulares del mismo marco algorítmico. La evolución temporal de la temperatura del metal líquido resulta de un balance térmico acoplado con la determinación de la distribución de la temperatura en los materiales refractarios y en la tapa, en la cual se consideran los efectos de adiciones arbitrarias de minerales durante la colada.

Como ejemplo de aplicación del Sistema TEMALC al presente estudio, en la figura 8 se muestran resultados obtenidos durante la etapa de precalentamiento para la opción a). Una distribución de isotermas a las 17 hs de iniciado el precalentamiento se grafica en la parte izquierda, mientras que a la derecha se muestra la variación temporal de la temperatura en varios puntos a través del espesor del refractario.

5.4. Termografías obtenidas en TAMSA

Personal de TAMSA ha obtenido termografías de tres cucharas de vaciado durante su proceso de trabajo, específicamente en las etapas que se listan a continuación:

De la Cuchara # 1:

Termografía 1) A la salida del quemador horizontal: día 20/01/03 a 12:22 p.m.
Termografía 2) A la entrada al Carro Morgan: día 20/01/03 a 12:23 p.m.
Termografía 3) A la salida del L.F.: día 20/01/03 a 01:26 p.m.
Termografía 4) A la salida del L.F.: día 20/01/03 a 01:26 p.m.
Termografía 5) A la salida del M.C.C: día 20/01/03 a 3:24 p.m.
Termografía 6) A la salida del M.C.C. Torreta: día 20/01/03 a 3:27 p.m.
Termografía 7) A la entrada del quemador horizontal: día 20/01/03 a 3:38 p.m.
Termografía 8) A la entrada del quemador horizontal: día 20/01/03 a 3:40 p.m.

De la Cuchara # 2:

Termografía 9) A la salida del quemador horizontal: día 24/01/03 a 10:35 a.m.
Termografía 10) A la entrada al Carro Morgan: día 24/01/03 a 10:36 p.m.
Termografía 11) A la salida del L.F.: día 24/01/03 a 12:03 p.m.
Termografía 12) A la salida del V.D.: día 24/01/03 a 12:36 p.m.
Termografía 13) A la llegada al M.C.C: día 24/01/03 a 12:45 p.m.
Termografía 14) A la salida del M.C.C. Torreta: día 24/01/03 a 2:10 p.m.
Termografía 15) A la entrada del quemador horizontal: día 24/01/03 a 2:24 p.m.
Termografía 16) A la entrada del quemador horizontal: día 24/01/03 a 2:25 p.m.

De la Cuchara # 3:

Termografía 17) A la salida del quemador horizontal: día 25/01/03 a 8:22 a.m.
Termografía 18) A la entrada al Carro Morgan: día 25/01/03 a 8:23 a.m.
Termografía 19) A la salida del L.F.: día 25/01/03 a 9:34 a.m.
Termografía 20) A la salida del L.F.: día 25/01/03 a 9:33 a.m.
Termografía 21) A la llegada al M.C.C: día 25/01/03 a 9:47 p.m.
Termografía 22) A la salida del M.C.C. Torreta: día 25/01/03 a 11:05 p.m.
Termografía 23) A la entrada del quemador horizontal: día 25/01/03 a 11:14 am.
Termografía 24) A la entrada del quemador horizontal: día 25/01/03 a 11:23 am.

5.5. Cálculos de la distribución de temperatura en toda la carcaza. Ajuste de coieficientes de transerencia térmica.

La distribución de temperatura en toda la extensión de la carcaza es obtenida resolviendo mediante el método de elementos finitos, con el Sistema ABAQUS, la ecuación de conducción de calor con condiciones de contorno tipo convectivas en todas sus superficies, e imponiendo conductancias conocidas entre la carcaza y los refuerzos, los muñones y las patas inferiores. La solución depende fuertemente de los coeficientes de las condiciones de contorno convectivas y de dichas conductancias, los cuales son parámetros que deben ajustarse convenientemente de manera que los cálculos coincidan de la mejor manera posible con las mediciones efectuadas de la temperatura.

A partir de las termografías listadas en el punto anterior, se han ajustado dichos coeficientes del modelo de cuchara con geometría original. A modo de ejemplo, algunos resultados se observan en las figuras 9, 10 y 11, contrastándose las termografías mostradas a la izquierda de cada figura con los resultados del modelo a la derecha de las mismas.

Los acuerdos alcanzados en la mayoría de los casos son ampliamente satisfactorios, lo que garantiza la confiabilidad de los cálculos de tensiones térmicas que se realizarán con el mismo sistema de cálculo, superpuestas con las tensiones producidas por las solicitaciones mecánicas, para las tres geometrías de olla a analizar.

5.6. Casos de carga contemplados para el cálculo de tensiones.

Se han calculado los estados de tensiones en las carcazas de la cuchara original y de las dos alternativas propuestas de extensión superior cónica y cilíndrica, ante dos diferentes condiciones de sustentación:

1) Estando la cuchara llena en su máxima capacidad con acero líquido, la misma se encuentra **soportada por sus dos muñones laterales**. Se consideraron en este caso las siguientes cargas:

   1.1) **Peso propio** de la cuchara y **peso de los refractarios** sobre el piso de la cuchara.

   1.2) **Distribución espacial de temperatura**, calculada con el ajuste por termografías descripto en la Sección 5.5.

   1.3) **Presión ferrostática** correspondiente a 158 Tm de acero líquido para la cuchara original y 169 para las modificadas.

   1.4) Presión sobre la carcaza ejercida por la **dilatación térmica de los refractarios**, de 1.05 MPa según la estimación realizada en la Sección 5.7 siguiente.

2) Estando la cuchara **apoyada en su base inferior**, y partiendo de una temperatura inicial correspondiente al final de un ciclo térmico (colado, cuchara llena, vaciado y cuchara vacía), se produce el colado de acero líquido en su interior. Se consideran también las mismas cargas del estado anterior:

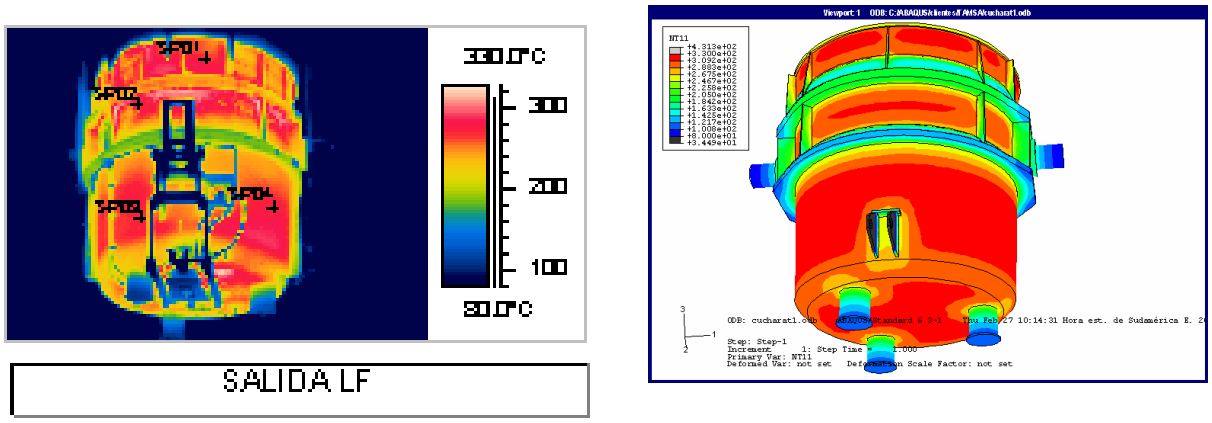

Figura 9. Termografía (izquierda) y simulación con ABAQUS (derecha) de la Cuchara N° 3 a la salida del LF.
Figure 9. *Termography (left) and modelling with ABAQUS (right) of the Laddle N° 3 at the exit of LF.*

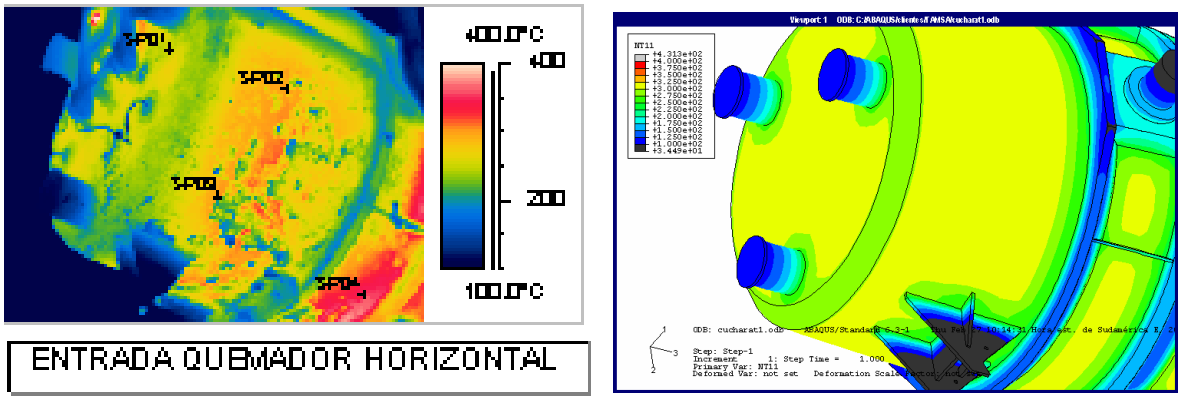

Figura 10. Termografía (izquierda) y simulación con ABAQUS (derecha) de la Cuchara N° 3 a la entrada del quemador horizontal.
Figure 10*. Termography (left) and modelling with ABAQUS (right) of the Laddle N° 3 at the inner of horizontal furnace.*

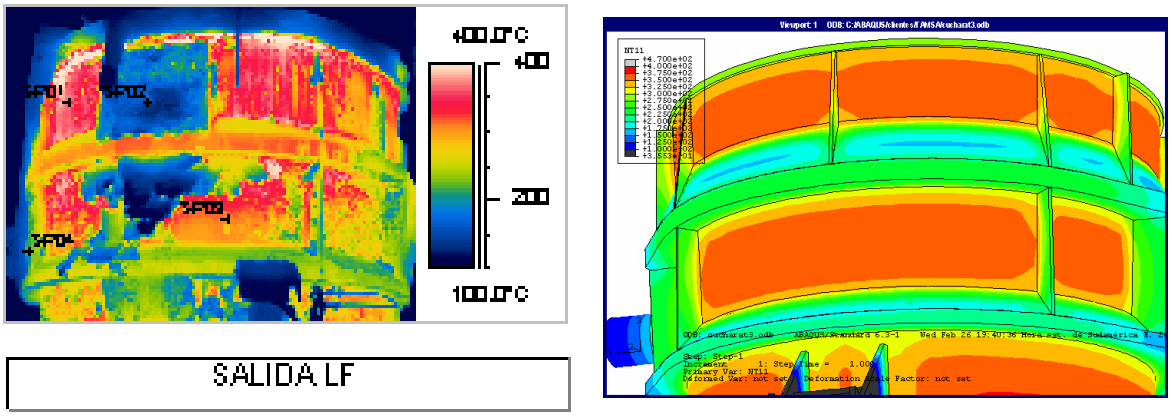

Figura 11. Termografía (izquierda) y simulación con ABAQUS (derecha) de la Cuchara N° 1 a la salida del LF.

Figure 11. *Termography (left) and modelling with ABAQUS (right) of the Laddle N° 1 at the exit of LF.*

2.1) **Peso propio** de la cuchara y **peso de los refractarios** sobre el piso de la cuchara.

2.2) **Distribución espacial de temperatura**, calculada con el ajuste por termografías descripto en la Sección 5.5.

2.3) **Presión ferrostática** correspondiente a 158 Tm de acero líquido para la cuchara original y 169 para las modificadas.

2.4) Presión sobre la carcaza ejercida por la **dilatación térmica de los refractarios**, de 1.05 MPa según la estimación realizada en la Sección 5.7 siguiente.

5.7.- Estimación de la presión máxima sobre la carcaza ejercida por la dilatación térmica de los refractarios.

En términos generales, dada la mayor dilatación térmica del refractario respecto de la dilatación de la carcaza, la porción interna de la capa de refractario está sometida a una tensión térmica de compresión mientras que la carcaza queda sometida a una tensión térmica de tracción que equilibra a la primera. Dado que el refractario tiene muy pequeña (o nula) resistencia a la tracción, se desarrollarán fisuras radiales en el lado frío de los ladrillos. Debido a la restricción que la carcaza impone a la dilatación térmica de los ladrillos refractarios, estos últimos ejercen sobre la carcaza una presión interna que se superpone a la presión ferrostática.

Para la estimación de esta presión adoptaremos una aproximación deducida por Schacht en ref. [22], basada en ecuaciones de interferencia termoelástica que se describen suscintamente a continuación.

Se supone con suficiente aproximación que la cuchara posee paredes totalmente cilíndricas, es decir, se desprecian los efectos de conicidad de la misma y de las porciones planas en la zona de los muñones. Se supone también que el espacio entre los refractarios y la carcaza es nulo a temperatura ambiente.

La temperatura en el espesor de la carcaza puede considerarse uniforme. Por su parte, aproximando el perfil de temperatura en el refractario de trabajo por una variación lineal en la dirección del espesor, se distinguen dos componentes de dicha variación que tienen efectos bien diferenciados:

1) **La temperatura promedio en el espesor del refractario**. Esta es la componente de la variación de la variación de la temperatura que provoca las fuerzas de dilatación. La fuerza de dilatación del refractario (F_L), de compresión, será equilibrada por la fuerza de dilatación de la carcaza (F_S), de tracción. La dilatación de la carcaza crea una tensión uniforme S_C''.

2) **Un gradiente de temperatura constante en el espesor del refractario**. Esta componente es la responsable de un momento ¨térmico¨ (M_T) en el refractario, y no tiene influencia sobre las fuerzas de dilatación F_L o F_S. Sin embargo, el momento térmico crea tensiones en el refractario. Dicha tensión térmica (S_C') es de compresión sobre la cara caliente del refractario y se suma a la tensión de compresión S_C'', resultando una tensión total $S_C''' = S_C' + S_C''$. Por su parte, sobre la cara fría del refractario, S_C' es una tensión de tracción que hace disminuir la tensión de compresión S_C''.

Se detalla en el Informe de ref. 3 la aplicación de esta aproximación a las cucharas bajo estudio, llegándose a los siguientes resultados:

En la cara fría: $S_C = S"_C + S'_C$ = - 28.8 + 17.0 = - 11.8 MPa

En la cara caliente: $S_C = S" - S'_C$ = -28.8 – 17.0 = - 45.8 MPa

Este último valor es algo superior al valor estimado de –36 MPa de análisis no lineal del comportamiento del refractario, como tensión extrema al comienzo del ciclo. Extrapolando los dos últimos resultados, se adopta entonces el valor de 1.05 MPa para la presión interna máxima que los refractarios ejercen sobre la carcaza.

Este valor de presión interna máxima de 1.05 MPa también se lo considera aplicable al revestimiento del barril de trabajo, por debajo de la línea de escoria.

5.8.- Estados de tensiones y deformaciones calculados en la cuchara original para el caso de carga 1) con la cuchara soportada de ambos muñones.

Como ejemplo de los cálculos realizados se muestran resultados del cálculo de tensiones y deformaciones en la cuchara original para el caso de carga 1, es decir, con la cuchara soportada de ambos muñones.

Los diagramas de deformación resultantes (con un factor de magnificación de deformaciones igual a 100) se observan en las figuras 14 y 15-izquierda desde las direcciones de los tres ejes coordenados *x*, *y*, *z*. La distribución de la tensión equivalente de von Mises en toda la carcaza se muestra en la figura 15-derecha, y en la figura 16 se hace lo propio con el detalle de la zona superior a los fines de comparar la cuchara original con los dos diseños propuestos de extensión superior.

Se observa en la figura 15-derecha que las mayores tensiones en la carcaza (que llegan a 90 MPa) se registran en la zona inferior. Esos niveles se disminuyen considerablemente con las cartelas de refuerzo vertical en esa zona, que se ven en las termografías. En el modelo esos refuerzos no se incluyeron pues no figuraban en los planos. En la figura 16 se observa que el mayor nivel de tensión equivalente se registra en el borde interior del tope superior (180 MPa).

6. COMPARACIONES DE NIVELES DE TENSIONES Y CONCLUSIONES.

En la siguiente tabla se resumen los valores máximos de tensiones calculados en las zonas de interés.

Zona considerada en la carcaza	Caso de carga	Cuchara original	Cuchara con extensión cónica	Cuchara con extensión cilíndrica
Zona inferior de la pared lateral con mayores tensiones.	1	84	87	95
	2	135	130	130
Borde interior del tope superior.	1	176	130	130
	2	41	20	40
Zona de la carcaza por encima del anillo de refuerzo superior, con mayores tensiones.	1	73	79	58
	2	55	52	56

Tabla 3. Resumen de valores máximos de tensiones, en MPa, calculados en las tres zonas de mayor interés.
Tabla 3*. Main maximum values of stresses, in MPa, calculated at the three zones of major interest.*

Actualmente las cucharas están diseñadas para alojar 170 Tm de acero líquido, teniendo la línea de acero a 524 mm de la brida superior menos 200 mm de la capa de escoria, de lo cual resulta un borde libre de 324 mm teóricos. De acuerdo al diseño, el espesor de los refractarios en las paredes era de 254 mm, y fue modificado a 324 mm para incrementar la vida útil de las cucharas en servicio. Este cambio en los refractarios afecta directamente la capacidad teórica de las cucharas, disminuyendo a 153.

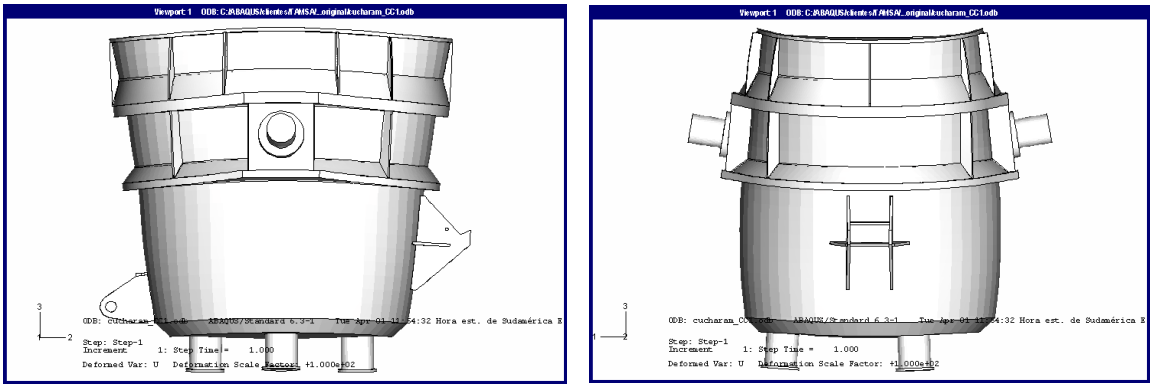

Figura 14. Diagrama de deformación de la cuchara original para el Caso de Carga 1 (apoyada en los muñones). Vistas desde el eje x (izquierda) y desde el eje y (derecha).
Figure 14*. Deformation diagrams of the original laddle for Load Case 1 (supported by the trunnions). Views from the x-axis (left) and from the y-axis (right).*

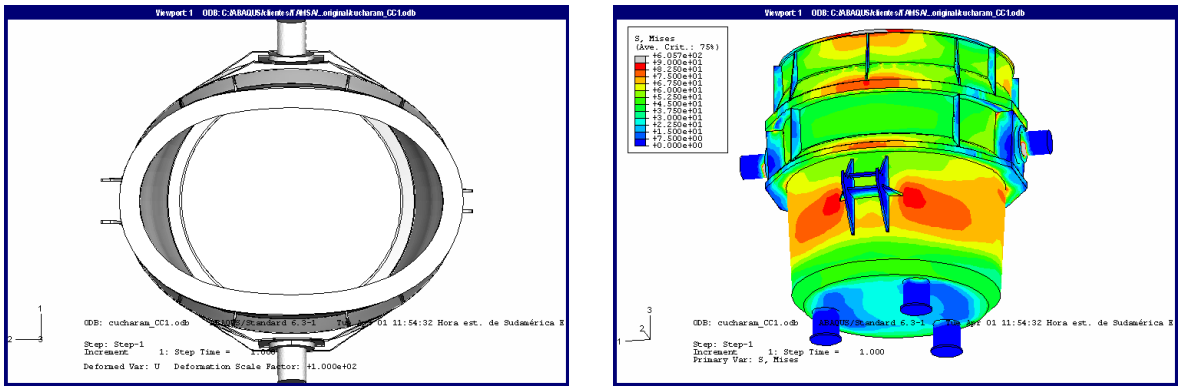

Figura 15. Izquierda: Diagrama de deformación de la cuchara original para el Caso de Carga 1 (apoyada en los muñones), visto desde el eje z. **Derecha:** Distribución de la tensión equivalente de von Mises en la cuchara original para el mismo Caso de Carga.
Figure 15. Left: *Deformation diagram of the original laddle for Load Case 1 (supported by the trunnions). Views from the z-axis.* ***Right****: Distribution of the von Mises equivalent stress in the original laddle for the same load case.*

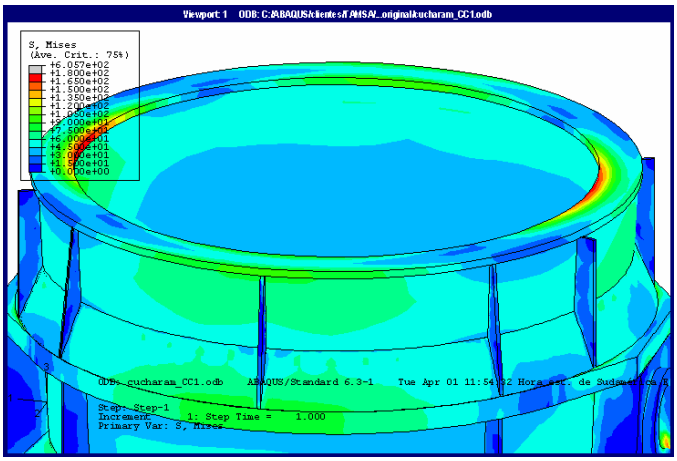

Figura 16. Distribución de la tensión equivalente de von Mises en la cuchara original para el Caso de Carga 1 (apoyada en los muñones).
Figure 16. *Distribution of the von Mises equivalent stress in the original laddle for Load Case 1 (supported by the trunnions).*

Con el presente estudio se busca incrementar la altura de la cuchara en 200 mm, lo que se reflejaría en un incremento de la capacidad teórica en 10 a 11 Tm, llevando la misma a un valor de 163 Tm.

Los análisis térmicos y de tensiones descriptos en el presente informe se inscriben en el marco de un proyecto de TAMSA concerniente a la evaluación de nuevos diseños de las cucharas de acería para el aumento de su capacidad actualEl diseño ha sido verificado mediante la aplicación de la Norma AISE N° 9 y sendos análisis estructurales mediante elementos finitos tanto de la geometría original como de ambas alternativas propuestas, empleando el Sistema de elementos finitos ABAQUS/Standard. Se han analizado los tres modelos de cuchara tanto bajo la aplicación de la Norma AISE N° 9 como de los resultados del análisis estructural por elementos finitos, surgiendo que ambas alternativas son factibles bajo el punto de vista estructural y no difieren mayormente en los niveles de tensiones alcanzados.

Referencias.

1. ABAQUS, Inc.: “ABAQUS/Standard. User’s Manual”. Versión 6.3-1. 2003.

2. ABAQUS, Inc.: “ABAQUS/CAE. User’s Manual”. Versión 6.3-1. 2003.
3. Sánchez Sarmiento, M. Mizdrahi y M. Pizzi: “Análisis estructural de cucharas de acería de TAMSA con aumento de se capacidad. Informe Final para TAMSA”. Informe Técnico de KB Engineering N° 006/2003. 26 de marzo de 2003.
4. Sánchez Sarmiento, G., A. Gastón y R. Topolevsky: “Transferencia de calor y tensiones térmicas en una cuchara de acero. Modelo TEMPCU”. G. Etse y B. Luccioni, Comps.: MECÁNICA COMPUTACIONAL, Vol. XVII, pp. 197-208, 1996.
5. Sánchez Sarmiento, G. y A. Gastón: “TEMPCU. An integrated system for the numerical simulation of the heat transfer and thermal stresses in casting ladles”. Proceedings of the Second International Symposium on Thermal Stressess and Related Topics, Rochester, New York, U.S.A., June 8-11, 1997.
6. G. Sánchez Sarmiento y A. Gastón: “Thermal and stress analysis of casting ladles by an integrated FEM Code”. Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories (UNITECR '97),. New Orleans, LA, U.S.A., Nov. 4-7, 1997.
7. Sánchez Sarmiento, G., H. Reggiardo y H. Madías, “IAS-TCUCHARA: Modelo computacional de la transferencia de calor en una cuchara con acero líquido acoplada con la evolución de la temperatura del metal”. Informe Técnico de MECACOMP . Octubre 1992.
8. Sánchez Sarmiento, G., A. Gastón y U. Bertezzolo: “TEMALC: Modelo computacional de la transferencia de calor en cucharas de acero líquido. Manual de Usuario”. Informe Técnico de Soft-Ing N° 011/2000. Octubre de 2000.
9. Gastón, A: “Métodos numéricos en el análisis de problemas de termotransferencia – Aplicaciones a la Siderurgia. Simulación de ciclos de operación de cucharas de acería y repartidores de colada contínua”. Tesis de Doctorado en Física. Facultad de C. Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, 1993.
10. Gastón, A. , R. Laura y M. Medina. “A model and numerical analysis for predicting the steel temperature of casting ladles”. Proc. 6th Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing Industries, Pergamon Press, Vol.1, 1990, págs.231-235.
11. Gastón, A. y M. Medina: “Modelado del comportamiento termomecánico de refractarios en aplicaciones siderúrgicas”. Mecánica Computacional, Vol. 15, 1995, AMCA, págs.555-564.
12. Gastón, A. , R. Laura y M. Medina: “Thermal cycle of continuous casting ladles: a mathematical model for predicting the steel temperature during tapping and the filling period”. Latin American Applied Research, Vol.3, 1993.
13. Gastón, A. y M. Medina: “Comportamiento térmico de cucharas de acería . Simulación Numérica de ciclos de operación”. Bol. Soc. Española de Cerámica y Vidrio, Vol.32, N°5, 1993, págs.371-378.
14. Gastón, A. y M. Medina: “Precalentamiento y enfriamiento de cucharas de acería. Abacos de Operación”. Mecánica Computacional, Vol.14, 1994, págs.392-403.
15. Gastón, A. y M. Medina: “Thermal Modeling of Casting Ladles: High-Alumina, dolomite, magnesite and magnesia-graphite refractories”. Iron and Steelmaker, January 1996, págs.29-35.
16. Gastón, R. Laura y M. Medina: “Model for predicting steel temperature and thermal state of casting tundishes”. Ironmaking and Steelmaking, vol. 18, No. 5, pp. 370-373 (1991).G. Sánchez Sarmiento y A. Gastón: “Análisis de tensiones termomecánicas en los refractarios de cucharas de acero líquido de SIDERAR S.A. en las zonas de muñones de soporte”. Informe Técnico de SOFT-ING para Refractarios Argentinos S.A. Junio de 1998.
17. G. Sánchez Sarmiento, A. Gastón, R. Topolevsky, J. Madías, S. Sylvestre Begnis, PC. Bastías: “Estudios de la evolución de la temperatura y de las tensiones térmicas en los refractarios y carcaza de cucharas de acería de SIDERAR SAIC”. Informe Técnico de KB Engineering N° 001-1999. Enero de 1999.
18. G. Sánchez Sarmiento, J.L. Otegui, R. Topolevsky, M. Mizdrahi, M. Pizzi. M.J.A. Solari, W. Agnese y J. Usart: “Análisis estructural de las cucharas de acería de SIDERAR con diseños alternativos de refuerzos superiores”. Informe Técnico de KB Engineering N° 001/2001 Enero de 2001.
19. M.J.A. Solari y G. Sánchez Sarmiento: “Análisis estructural de cucharas de acería de TAMSA. Verificación del proyecto de modificación con la Norma AISE N° 9”. Informe Técnico de KB Engineering N° 002-2003. Enero de 2003.
20. AISE Technical Report N° 9: “Specification for Design and Use of Ladles”. AISE, Agosto de 1991.
21. M.J.A. Solari y G. Sánchez Sarmiento: “Verificación de una cuchara de colada de 190 t con la Especificación AISE N° 9”. Informe Técnico de KB Engineering N° 012/2000. Septiembre de 2000.
22. C.A. Schacht: ¨Refractory Linings: Thermomechanical Design and Applications¨. Marcel Dekker, Inc., 1995.